阿魏酸对 *ob/ob* 小鼠脂肪沉积及腹脂脂肪酸组成的影响

潘奕鸥[1,2,3] 王薇薇[2] 李爱科[2] 张卫卫[1] 韩四海[1] 刘建学[1,3*]

（1.河南科技大学食品与生物工程学院，洛阳 471023；2.国家粮食局科学研究院，北京 100037；3.河南省食品原料工程技术研究中心，洛阳 471023）

摘 要：本试验旨在研究阿魏酸对 *ob/ob* 小鼠脂肪沉积和腹脂脂肪酸组成的影响。选取 5 周龄的雄性 *ob/ob* 小鼠 30 只，随机分为 3 组（n=10），分别饲喂在基础饲粮中分别添加 0(对照组)、0.25%和 0.50%阿魏酸的试验饲粮，试验期 9 周。结果表明：与对照组相比，饲粮中添加 0.25%和 0.50%的阿魏酸显著降低了 *ob/ob* 小鼠的总增重、腹脂率（P<0.05），显著降低了血清甘油三酯及肝脏甘油三酯和总胆固醇水平（P<0.05），减少了肝脏脂滴积累，显著降低了腹脂中棕榈油酸和油酸的含量（P<0.05），显著降低了腹脂中脂肪酸饱和度指数棕榈油酸/棕榈酸和油酸/硬脂酸（P<0.05）。由此得出，阿魏酸可以抑制 *ob/ob* 小鼠的脂肪沉积，改善其腹脂脂肪酸组成，减重降脂效果明显。

关键词：阿魏酸；*ob/ob* 小鼠；肥胖；脂肪沉积；脂肪酸组成

中图分类号：S816 文献标识码：A 文章编号：

阿魏酸（ferulic acid,FA）化学名 4-羟基-3-甲氧基-2-丙烯酸，是一种酚类化合物，普遍存在于中药、粮食、蔬菜、水果中[1-2]，其在谷物麸皮中含量较高[3]，在全麦粉中的含量为 1.252 g/kg，在玉米面中的含量更高达 2.317 g/kg[4]。多酚类物质，如苹果多酚、茶多酚和葡萄籽多酚一般具有强抗氧化性，对高血脂、糖尿病等有一定的调节作用[5-7]。FA 也有极强的抗氧化性[8]，并对 II 型糖尿病、高血压和心脑血管疾病等有一定的治疗效果[9-12]。肥胖病主

收稿日期：2016-01-25

基金项目：公益性（粮食）行业专项“粮油营养健康特性研究与基础参数数据库的构建”（201313011-6）；河南省重点攻关项目“农产品加工副产物的高效增值和循环利用关键技术研究”（142102310262）

作者简介：潘奕鸥（1990-），男，河南洛阳人，硕士研究生，研究方向为生物化学与分子生物学。E-mail: lynnouou@163.com

*通信作者：刘建学，教授，硕士生导师，E-mail: jx_liu@163.com

要表现在机体脂肪的过量积累，并且是II型糖尿病、心脑血管疾病等的主要诱发因素之一[13]。多酚类物质及其衍生物，如富含 FA 的咖啡多酚、酒花多酚、没食子酸、没食子儿茶素和没食子酸酯均具有抑制脂肪积累的效果[14-17]。Son 等[18]研究发现，在饲粮中添加 FA 或 FA 酯化物质谷维素可以显著抑制高脂饮食诱导的肥胖小鼠的体重增加，使总增重分别降低了47.50%和 26.67%；Senaphan 等[19]研究认为，大鼠每天口服 30 或 60 mg/kg BW 的 FA 可以改善高脂高碳水化合物诱导的代谢综合征，降低大鼠血清中甘油三酯（triglyceride,TG）和总胆固醇（total cholesterol,TC）的水平，并降低代谢综合征大鼠的体重。但是这些报道并未以脂肪变化为研究重点，只对体重、血脂水平等进行了检测分析，而 FA 对肥胖机体脂肪沉积和脂肪代谢等方面的影响尚未见系统报道。*ob*/*ob* 小鼠是瘦素基因缺陷型小鼠，在青年时期即会严重超重，并形成肥胖病相关的体脂紊乱，如高血脂、肝脏脂质沉积等[20]。本试验以雄性 *ob*/*ob* 小鼠为研究对象，研究饲粮中添加不同量的 FA（0.25%或 0.50%）对 *ob*/*ob* 小鼠脂肪沉积和腹脂中脂肪酸组成的影响，旨在为进一步探明 FA 对预防和治疗肥胖病的功效提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

FA 标准品：粉末状，纯度≥99%，购于上海晶纯生化科技股份有限公司。

TG 和 TC 检测试剂盒购于南京建成生物工程研究所，脂肪酸标准品购于北京普析科技有限公司，其他常规试剂均为分析纯。

主要试验仪器如下：Synergy™ HT 酶标仪（Biotek 公司，美国）；海尔立式超低温保存箱（青岛海尔特种电器有限公司）；Centrifuge-5810R 型高速冷冻离心机（Eppendorf 公司，德国）；罗氏生化分析仪（Roche 公司，瑞士）；7890A 气相色谱附氢火焰（FID）检测器，色谱柱为 DB-23（Agilent 公司，美国）；KD-BMIII生物组织包埋机、KD-3368AM 切片机、KEDEE 生物组织染色机（金华市科迪仪器设备有限公司）等。

1.2 动物饲养管理

30 只 5 周龄、体重相近的雄性 *ob/ob* 小鼠，购于北京华阜康生物科技股份有限公司，为无特定病原体级（specified pathogen free,SPF）。*ob/ob* 小鼠基础饲粮由南通特洛菲饲料科技有限公司提供，依照 AIN-93M 标准饲料配方设计，其组成及营养水平见表 1。*ob/ob* 小鼠饲养在 SPF 实验动物房（国家粮食局科学研究院，北京）的独立送风笼具（individual ventilated cage,IVC）中。饲养室保持温度（23±2） ℃，相对湿度 50%，12 h/12 h 光照日夜循环。配对饲喂，充足饮水，预饲 1 周。

表 1 基础饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 1 Composition and nutrient levels of the basal diet (air-dry basis)

项目 Items	含量 Content
原料 Ingredients/(g/kg)	
酪蛋白 Casein	187.26
L-半胱氨酸 *L*-cystine	3.02
玉米淀粉 Corn starch	449.72
糊精 Dextrin	200.37
蔗糖 Sucrose	69.20
豆油 Soybean oil	42.13
矿物质与维生素预混料 Mineral and vitamin premix	48.30
合计 Total	1 000.00
营养水平 Nutrient levels	
总能量 Total energy/(MJ/kg)	15.89
粗蛋白质 CP/%	17.10
碳水化合物 Carbohydrate/%	68.40

粗脂肪 EE/%	4.22

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计

将 30 只 *ob*/*ob* 小鼠随机分成 3 组，每组 10 个重复，每个重复 1 只，分笼饲养。对照组（CON 组）、低剂量 FA 添加组（L-FA 组）和高剂量 FA 添加组（H-FA 组）*ob*/*ob* 小鼠分别饲喂在基础饲粮中添加 0、0.25%和 0.50% FA 的试验饲粮。每周测定各组 *ob*/*ob* 小鼠体重、周采食量，称重前禁食 12 h，试验期为 9 周。

1.3.2 样品采集

采样前禁食 12 h，称量 *ob*/*ob* 小鼠终体重。摘除小鼠眼球采集血样，分离血清，冻存于-80 ℃待测。采集血样后，*ob*/*ob* 小鼠断颈处死，解剖分离肝脏和腹部白色脂肪组织（white adipose tissue,WAT），称重后计算肝脏指数和腹脂率。取同一部位的肝组织，存于 10%甲醛固定液中。剩余肝组织与 WAT 一并冻存于-80 ℃待测。

肝脏指数（%）＝（肝脏重/体重）×100；

腹脂率（%）＝（腹部 WAT 重/体重）×100。

1.3.3 血脂水平检测

用生化分析仪检测血清中 TG、TC、高密度脂蛋白胆固醇（high density lipoprotein cholesterol,HDL-C）和低密度脂蛋白胆固醇（low density lipoprotein cholesterol,LDL-C）的水平。

1.3.4 肝脂水平检测

肝脏匀浆依照南京建成生物工程研究所提供的的方法制备,按照检测试剂盒说明书采用酶联免疫法检测肝脏中 TG 和 TC 水平。

1.3.5 肝脏病理学分析

取固定 24 h 后的肝组织，包埋处理后，切片（厚度为 5 μm），经苏木精-伊红

（hematoxylin-eosin staining,HE）染色后在光学显微镜下以 10×25 倍视野观察肝组织中脂滴大小和密度变化。

1.3.6　脂肪组织脂肪酸组成检测

按照 GB/T 9695.7-2008 操作，得到小鼠脂肪组织中的油脂并按照 GB/T 17367-2008 的方法，用三氟化硼法对其脂肪酸进行甲酯化，利用气相色谱法（GB/T 17377-2008）分析其脂肪酸组成，主要包括棕榈酸（palmitic acid,C16:0）、棕榈油酸（palmitoleic acid,C16:1）、硬脂酸（stearic acid,C18:0）和油酸（oleic acid,C18:1）的含量（质量百分数），以及脂肪酸的饱和度指数 C16:1/C16:0 和 C18:1/C18:0。

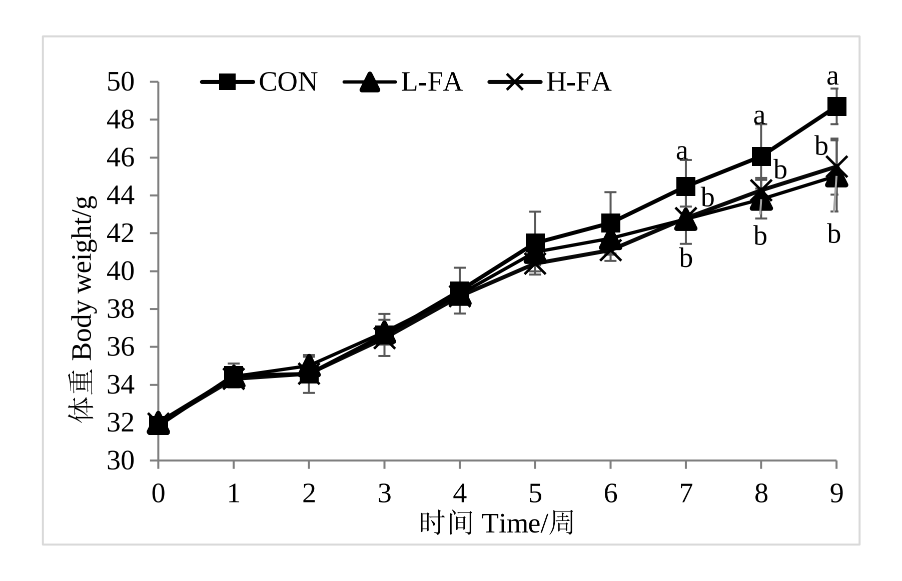
1.4　数据统计分析

试验数据用平均值±标准差表示，采用 SAS 9.0 统计软件中的 ANOVA 过程进行单因素方差分析，P<0.05 为差异显著。

2　结　果

2.1　FA 对 *ob*/*ob* 小鼠体重、总增重和总采食量的影响

由图 1 可知，饲养期初始，各组 *ob*/*ob* 小鼠体重均呈稳定增长趋势，与 CON 组 *ob*/*ob* 小鼠相比，前 4 周 L-FA 组和 H-FA 组 *ob*/*ob* 小鼠的体重没有显著差异（P>0.05）。第 5、6 周，L-FA 组和 H-FA 组 *ob*/*ob* 小鼠体重增长趋于平缓。第 7 周开始至饲养期结束，L-FA 组与 H-FA 组 *ob*/*ob* 小鼠体重均显著低于 CON 组（P<0.05）。



同一时间点，数据点无字母或有相同字母标注表示差异不显，有不同小写字母标注表示差异显著（$P<0.05$）。

At the same time piont, data points with no letter or the same letters mean no significant difference ($P>0.05$), while with different small letters mean significant difference ($P<0.05$).

图 1　各组 *ob*/*ob* 小鼠每周体重变化

Fig.1　Body weight change weekly of *ob*/*ob* mice in groups

由表 2 可知，各组总采食量无显著差异（$P>0.05$），L-FA 组与 H-FA 组 ob/ob 小鼠的总增重显著低于 CON 组（$P<0.05$）。

表 2　各组 *ob*/*ob* 小鼠的总增重和总采食量

Table 2　Total weight gain and total feed intake of *ob*/*ob* mice in groups　　g

项目 Items	组别 Groups			*P* 值 *P*-value
	CON	L-FA	H-FA	
总增重 Total weight gain	16.87±2.73[a]	12.98±2.90[b]	13.59±2.48[b]	0.016 3
总采食量 Total food intake	206.43±18.88	191.56±9.13	195.20±11.34	0.244 9

同行数据肩标无字母或相同字母表示差异不显著（$P>0.05$），不同小写字母表示差异显

著（*P*＜0.05）。下表同。

In the same row, values with no letter or the same letter superscripts mean no significant difference (*P*＞0.05), while with different small letter superscripts mean significant difference (*P*＜0.05). The same as below.

2.2 FA对*ob*/*ob*小鼠肝脏指数和腹脂率的影响

由表 3 可知，L-FA 组与 H-FA 组 *ob*/*ob* 小鼠的肝脏重和肝脏指数与 CON 组无显著差异（*P*>0.05），但 L-FA 组和 H-FA 组 *ob*/*ob* 小鼠的肝脏重均有降低的趋势（*P*<0.10）。与 CON 组相比，饲粮中添加 0.25%或 0.50%的 FA 显著降低了 *ob*/*ob* 小鼠的腹部 WAT 重和腹脂率（*P*<0.05）。

表 3 各组 *ob*/*ob* 小鼠的肝脏指数和腹脂率

Table 3 Liver index and abdomen fat percentage of *ob*/*ob* mice in groups

项目 Items	组别 Groups			*P* 值 *P*-value
	CON	L-FA	H-FA	
肝脏重 Liver weight/g	2.46±0.35	2.08±0.20	2.08±0.44	0.055 9
肝脏指数 Liver index/%	5.04±0.67	4.56±0.86	4.64±0.48	0.327 5
腹部白色脂肪组织重 Abdomen WAT/g	4.46±0.19[a]	3.36±0.18[b]	3.48±0.24[b]	<0.000 1
腹脂率 Abdomen fat percentage/%	9.15±0.36[a]	7.45±0.51[b]	7.67±0.59[b]	0.004 2

2.3 FA 对 *ob*/*ob* 小鼠血脂水平的影响

由表 4 可知，饲粮中添加 0.25%或 0.50%的 FA 对 *ob*/*ob* 小鼠的血清 TC 和 LDL-C 水平均没有产生显著影响（*P*>0.05）。L-FA 组与 H-FA 组 *ob*/*ob* 小鼠的血清 TG 水平显著降低于 CON 组（*P*<0.05），只有当 FA 添加量为 0.50%时，*ob*/*ob* 小鼠的血清 HDL-C 水平才得到显

著提高（*P*<0.05），L-FA 组 *ob*/*ob* 小鼠的血清 HDL-C 水平与 CON 组无显著差异（*P*>0.05）。

表 4　各组 *ob*/*ob* 小鼠血清 TG、TC、HDL-C 和 LDL-C 水平

Table 4　Serum TG, TC, HDL-C and LDL-C levels of *ob*/*ob* mice in groups

mmol/L

项目 Items	组别 Groups			*P* 值 *P*-value
	CON	L-FA	H-FA	
甘油三酯 TG	1.80±0.04[a]	1.61±0.04[b]	1.69±0.04[b]	0.022 9
总胆固醇 TC	6.70±1.32	6.07±1.62	6.01±0.89	0.662 9
高密度脂蛋白胆固醇 HDL-C	4.67±0.64[b]	4.76±0.19[b]	5.52±0.53[a]	0.029 6
低密度脂蛋白胆固醇 LDL-C	1.26±0.36	1.02±0.55	1.02±0.36	0.597 3

2.4　FA 对 *ob*/*ob* 小鼠肝脂水平的影响

由表 5 可知，与 CON 组相比，饲粮中添加 0.25%和 0.05%的 FA 使 *ob*/*ob* 小鼠肝脏 TG 水平分别降低了 50.00%和 39.29%，肝脏 TC 水平显著降低了 39.62%和 43.72%（*P*<0.05），差异均达到显著水平（*P*<0.05）。

表 5　各组 *ob*/*ob* 小鼠肝脏 TG 和 TC 水平

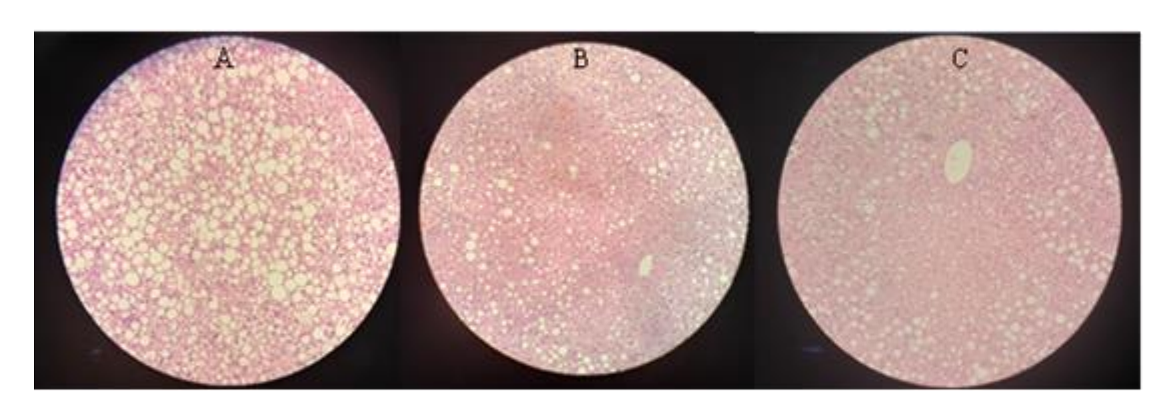
Table 5　Liver TG and TC levels of *ob*/*ob* mice in groups

项目 Items	组别 Groups			*P* 值 *P*-value
	CON	L-FA	H-FA	
甘油三酯	0.28±0.06[a]	0.14±0.02[b]	0.17±0.04[b]	<0.000 1

TG/(mmol/g prot)				
总胆固醇 TC/(μmol/g prot)	38.84±0.45[a]	23.45±0.35[b]	21.86±0.27[b]	<0.000 1

2.5 *ob*/*ob*小鼠肝脏病理学分析

由图 2 可知，同为 10×25 倍视野下，CON 组 *ob*/*ob* 小鼠肝脏脂滴大而密集（图 2-A），而 L-FA 组 *ob*/*ob* 小鼠肝脏脂滴明显减少（图 2-B），并且大部分脂滴直径小于 CON 组，H-FA 组 *ob*/*ob* 小鼠肝脏脂滴大小与密集程度相对于 CON 组也得到了明显改善（图 2-C）。



A 为 CON 组 *ob*/*ob* 小鼠肝脏组织切片，B 为 L-FA 组 *ob*/*ob* 小鼠肝脏组织切片，C 为 H-FA 组 *ob*/*ob* 小鼠肝脏组织切片。

A, liver section of *ob*/*ob* mice in CON group; B, liver section of *ob*/*ob* mice in L-FA group; C, liver section of *ob*/*ob* mice in H-FA group.

图 2　各组 *ob*/*ob* 小鼠肝脏组织切片 HE 染色观察

Fig.2　Observation on HE staining of liver tissue sections of *ob*/*ob* mice in groups (250×)

2.6 FA 对 *ob*/*ob* 小鼠腹脂脂肪酸组成和饱和度指数的影响

由表 6 可知，FA 对 *ob*/*ob* 小鼠腹脂中 C16:0 和 C18:0 含量无显著影响（P>0.05），但对 C16:1 和 C18:1 含量的增高有显著的抑制作用（P<0.05）。L-FA 组与 H-FA 组 *ob*/*ob* 小鼠腹脂脂肪酸的饱和度指数 C16:1/C16:0 和 C18:1/C18:0 显著低于 CON 组（P<0.05），且 H-FA 组 C18:1/C18:0 还显著低于 L-FA 组（P<0.05）。

表 6　各组 *ob*/*ob* 小鼠腹脂脂肪酸组成和饱和度指数

Table 6　Fatty acid composition and desaturation index in abdominal lipid of *ob*/*ob* mice in groups

项目 Items	组别 Groups			*P* 值 *P*-value
	CON	L-FA	H-FA	
棕榈酸 C16:0/%	10.37±0.20	10.51±0.85	10.69±0.51	0.799 7
棕榈油酸 C16:1/%	11.32±0.18[a]	9.64±0.50[b]	9.47±0.09[b]	<0.000 1
棕榈油酸/棕榈酸 C16:1/C16:0	1.09±0.02[a]	0.92±0.03[b]	0.87±0.04[b]	<0.000 1
硬脂酸 C18:0/%	4.60±0.05	4.60±0.06	4.68±0.04	0.190 6
油酸 C18:1/%	10.82±0.03[a]	9.91±0.48[b]	9.50±0.14[b]	0.003 0
油酸/硬脂酸 C18:1/C18:0	2.35±0.02[a]	2.16±0.09[b]	2.03±0.02[c]	0.001 3

3　讨　论

本试验通过在饲粮中添加一定量的 FA，研究 FA 是否会对 *ob*/*ob* 小鼠的增重以及脂肪沉积和代谢有改善作用。本试验采用配对饲喂，使各组最终绝对总采食量无显著差异，各组 *ob*/*ob* 小鼠平均 FA 日摄入量分别为：CON 组，0 mg/d；L-FA 组，7.6 mg/d；H-FA 组，15.5 mg/d，符合试验所设计的 FA 摄入梯度。

由试验结果可知，L-FA 组和 H-FA 组 *ob*/*ob* 小鼠的总增重分别比 CON 组减少了 23.01% 和 19.4%，Son 等[18]的研究表明在饲粮中添加 0.50% FA 可以使总增重降低 26.67%，与此相一致，但本研究结果说明更小的 FA 添加量也可达到减重的效果。与之类似的，饲粮中添加

0.25% FA 使 *ob*/*ob* 小鼠的脂肪重减少了 24.66%，腹脂率降低了 18.58%，而 H-FA 组 *ob*/*ob* 小鼠的脂肪重和腹脂率分别减少了 21.97%和 16.17%。各组 *ob*/*ob* 小鼠的肝脏指数无显著差异，饲粮中添加 0.25%和 0.50%的 FA 均使 *ob*/*ob* 小鼠的肝脏重降低了 15.4%，有趋势但不显著，这说明 FA 对 *ob*/*ob* 小鼠脂肪沉积的抑制可能主要作用于脂肪组织。相对于 CON 组，L-FA 组和 H-FA 组 *ob*/*ob* 小鼠肝脏中 TG 水平分别降低了 50.00%和 39.29%，TC 水平分别降低了 39.62%和 43.72%，这与图 2 显示出的 FA 具有改善肝脏脂滴积累的作用相一致，说明 0.25%和 0.50% FA 虽未显著降低 *ob*/*ob* 小鼠的肝脏重，但可以抑制肝脏中脂质的积累。不同的是，Wang 等[21]的研究发现口服 FA 虽可以降低高脂饲粮诱导的肥胖大鼠肝脏中 TC 水平，但是 TG 水平只有降低的趋势。其可能的原因是口服大量的 FA 与饲粮中含的 FA 在体内消化吸收的效率不同。在血液中，HDL-C 的主要功能是促进血清中胆固醇的逆向转运[22]。本试验结果表明，H-FA 组 *ob*/*ob* 小鼠的血清 HDL-C 水平相对于 CON 组显著提高，但血清 TC 水平没有显著变化。这与 Marimuthu 等[23]研究的结果并不相同，他们发现口服 FA 的代谢综合征大鼠的血清 HDL-C 水平比 CON 组升高了 74.56%，血清 TC 水平则降低了 35.37%。结果的差异可能是 FA 的摄入量和摄入方式不同导致。L-FA 组与 H-FA 组 *ob*/*ob* 小鼠的血清 TG 水平相比 CON 组分别降低了 10.56%和 6.11%，而 Marimuthu 等[23]也报道高脂血症大鼠每天注射 20 mL/kg FA 可以显著降低血清与肝脏中的 TG 水平，与此结果类似。

Jeyakumar 等[24]研究发现，饮食诱导肥胖大鼠模型中，大鼠脂肪组织的饱和度指数 C16:1/C16:0 和 C18:1/C18:0 会升高，但是该研究并未关注 FA 对脂肪酸组成的影响。在本试验中，相对于 CON 组，L-FA 组 *ob*/*ob* 小鼠腹脂脂肪酸的饱和度指数 C16:1/C16:0 和 C18:1/C18:0 分别显著降低了 15.59%和 8.09%，H-FA 组则分别降低了 20.18%和 13.62%，差异均达到显著水平。FA 对脂肪组织中 C16:0 和 C18:0 的含量没有显著的改善作用，但是 FA 降低了 C16:1 和 C18:1 的含量，从而降低了 *ob*/*ob* 小鼠的饱和度指数 C16:1/C16:0 和 C18:1/C18:0。硬脂酰辅酶 A 脱氢酶（stearoyl-CoA desaturase,SCD）是一种内质网酶，可以

催化不饱和脂肪酸的合成[25]。在缺少 *SCD* 基因的 *ob/ob* 小鼠中，脂肪组织中 C16:1 和 C18:1 的含量及饱和度指数 C16:1/C16:0 和 C18:1/C18:0 有所降低[26]。因此，本试验中 FA 可能通过下调 *SCD* 基因的表达，有效减少不饱和脂肪酸的合成，抑制 *ob/ob* 小鼠的脂肪合成进程。

在本试验条件下，FA 添加量为 0.25%时对 *ob/ob* 小鼠的总增重、腹脂、血清与肝脏的 TG 水平的改善作用都略高于添加量为 0.50%时，但 0.50%的 FA 对 *ob/ob* 小鼠的血清和肝脏 TC 水平有较好的改善效果。由此可知，若以减重降脂为目的，0.25%为适宜添加量，若以降胆固醇为目的，则 0.50%为较适宜添加量。FA 等酚酸在人们日常饮食中含量丰富，在玉米等粗粮中的含量接近 0.25%，这就鼓励人们在日常饮食中多以玉米、小米和糙米等富含 FA 等多酚类物质的谷物作为主食，提高对此类植物化学素的摄取，达到预防肥胖的保健效果。

4 结 论

本试验条件下，饲粮中添加 0.25%和 0.50%的 FA 均能够抑制 ob/ob 小鼠体重的增加，降低脂肪组织重量及腹脂率，降低血脂和肝脂水平，改善肝脏脂滴积累程度。以减重降脂为目的时，0.25%为较适宜添加量；以降胆固醇为目的时，0.5%为较适宜添加量。

参考文献：

[1] 殷华芳,钱晓萍,刘宝瑞.阿魏酸抗肿瘤作用机制研究进展[J].现代中西医结合杂志,2010,19(32):4238–4240.

[2] D’ARCHIVIO M,FILESI C,DI BENEDETTO R,et al.Polyphenols,dietary sources and bioavailability[J].Annali dell’Istituto Superiore di Sanità,2007,43(4):348–361.

[3] 郝杰,张长虹,曹学丽.七种谷物麸皮中的酚酸类成分分析[J].食品科学,2010,31(10):263–267.

[4] 张伟,耿欣.不同食品中阿魏酸含量的分析[J].食品研究与开发,2012,33(8):126–128.

[5] 李新明,高忠东,李群,等.苹果多酚对高脂模型大鼠血脂代谢的调节作用[J].安徽农业科学,2015,43(2):69–71.

[6] 杨小兰,毛立新,张晓云.黑桑椹对高脂血症大鼠的降脂作用研究[J].食品科学,2006,26(9):509–510.

[7] 熊何健,周常义,郑新阳,等.葡萄籽多酚对高脂膳食小鼠降血脂和抗氧化功能的影响[J].江西农业学报,2008,20(1):105–107.

[8] TROMBINO S,SERINI S,DI NICUOLO F,et al.Antioxidant effect of ferulic acid in isolated membranes and intact cells:synergistic interactions with α-tocopherol,β-carotene,and ascorbic acid[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry,2004,52(8):2411–2420.

[9] ARDIANSYAH,OHSAKI Y,SHIRAKAWA H,et al.Novel effects of a single administration of ferulic acid on the regulation of blood pressure and the hepatic lipid metabolic profile in stroke-prone spontaneously hypertensive rats[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry,2008,56(8):2825–2830.

[10] ALAM M A,SERNIA C,BROWN L.Ferulic acid improves cardiovascular and kidney structure and function in hypertensive rats[J].Journal of Cardiovascular Pharmacology,2013,61(3):240–249.

[11] ROY S,METYA S K,SANNIGRAHI S,et al.Treatment with ferulic acid to rats with streptozotocin-induced diabetes:effects on oxidative stress,pro-inflammatory cytokines,and apoptosis in the pancreatic β cell[J].Endocrine,2013,44(2):369–379.

[12] COYLE D R.High fat diet effects on erythrophagocytosis and mcp-1 levels in mice[D].Ph.D.Thesis.Ohio State:University of Cincinnati,2012.

[13] ZOU C H,SHAO J H.Role of adipocytokines in obesity-associated insulin resistance[J].The Journal of Nutritional Biochemistry,2008,19(5):277–286.

[14] MURASE T,MISAWA K,MINEGISHI Y,et al.Coffee polyphenols suppress diet-induced body fat accumulation by downregulating SREBP-1c and related molecules in C57BL/6J mice[J].American Journal of Physiology: Endocrinology and Metabolism,2010,300(1):E122–E133.

[15] CHAO J,HUO T I,CHENG H Y,et al.Gallic acid ameliorated impaired glucose and lipid homeostasis in high fat diet-induced NAFLD mice[J].PLoS One,2014,9(6):e96969.

[16] 韩超,范小兵,王少康,等.表没食子儿茶素没食子酸酯对肥胖模型大鼠减肥作用的实验研究[J].现代医学,2008,36(3):197–199.

[17] 郭苗,杨小兰.酒花多酚对高脂血症小鼠的降脂与抗氧化作用[J].食品科学,2015,36(3):183–187.

[18] SON M J, RICO C W, NAM S H,et al.Influence of oryzanol and ferulic acid on the lipid metabolism and antioxidative status in high fat-fed mice[J].Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition,2010,46(2):150–156.

[19] SENAPHAN K,KUKONGVIRIYAPAN U,SANGARTIT W,et al.Ferulic acid alleviates changes in a rat model of metabolic syndrome induced by high-carbohydrate,high-fat diet[J].Nutrients,2015,7(8):6446–6464.

[20] LINDSTRÖM P.β-cell function in obese-hyperglycemic mice[*ob/ob* mice][J].Advances in Experimental Medicine and Biology,2010,654:463–477.

[21] WANG O,LIU J,CHENG Q,et al.Effects of ferulic acid and γ-oryzanol on high-fat and high-fructose diet-induced metabolic syndrome in rats[J].PLos One,2015,10(2).e0118135.

[22] MARANHÃO R C,FREITAS F R.HDL metabolism and atheroprotection:predictive value of lipid transfers[J].Advances in Clinical Chemistry,2014,65:1–41.

[23] MARIMUTHU S,ADLURI R S,RAJAGOPALAN R,et al.Protective role of ferulic acid on carbon tetrachloride-induced hyperlipidemia and histological alterations in experimental rats[J].Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology,2013,24(1):59–66.

[24] JEYAKUMAR S M,LOPAMUDRA P,PADMINI S,et al.Fatty acid desaturation index correlates with body mass and adiposity indices of obesity in Wistar NIN obese mutant rat strains WNIN/Ob and WNIN/GR-Ob[J].Nutrition & Metabolism,2009,6(27):1722–1726.

[25] NTAMBI J M,MIYAZAKI M,STOEHR J P,et al.Loss of stearoyl-CoA desaturase-1 function protects mice against adiposity[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2002,99(17):11482–11486.

[26] PATON C M,NTAMBI J M.Biochemical and physiological function of stearoyl-CoA desaturase[J].American Journal of Physiology:Endocrinology and Metabolism,2009,297(1):E28–E37.

Effects of Ferulic Acid on Lipid Deposition and Fatty Acid Composition in Abdominal Lipid of *ob*/*ob* Mice

PAN Yiou[1,2,3] WANG Weiwei[2] LI Aike[2] ZHANG Weiwei[1] HAN Sihai[1] LIU Jianxue[1,3]

(1. *College and Food and Bioengineering*, *Henan University of Science and Technology*, *Luoyang* 471023, *China*; 2. *Academy of State of Administration of Grain*, *Beijing* 100037, *China*; 3. *Henan Engineering Research Center of Food Material*, *Luoyang* 471023, *China*)

Abstract: This experiment was conducted to study the effects of ferulic acid (FA) on lipid deposition and fatty acid composition in abdominal lipid of *ob*/*ob* mice. A total of 30 male *ob*/*ob* mice at 5 weeks old were randomly divided into 3 groups (*n*=10). *ob*/*ob* mice in the 3 groups were

*Corresponding author, professor, E-mail: jx_liu@163.com （责任编辑　菅景颖）

fed the basal diets supplemented with 0 (control group), 0.25% and 0.50% FA, respectively. The experiment lasted for 9 weeks. The results showed that compared with control group, FA significantly reduced the total weight gain and abdomen fat percentage （$P<0.05$）, significantly lessened the serum TG and liver TG and TC levels （$P<0.05$）, attenuated accumulation of lipid droplet, significantly suppressed the contents of palmitoleic acid and oleic acid in abdominal lipid （$P<0.05$）, and significantly decreased the desaturation indexes—palmitoleic acid/ palmitic acid and oleic acid/ stearic acid in abdominal lipid （$P<0.05$）. It is concluded that FA can inhibit the lipid deposition and ameliorate the fatty acid composition in abdominal lipid, and the weight-reducing and lipid-lowering effect is obvious.

Key words: ferulic acid; *ob*/*ob* mice; obesity; lipid deposition; fatty acid composition